

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-051874

(43)Date of publication of application : 26.02.1999

(51)Int.Cl.

G01N 21/88  
H01L 21/66

(21)Application number : 09-211057

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 05.08.1997

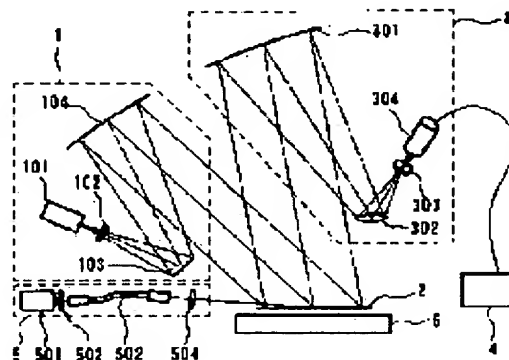
(72)Inventor : KATO KINYA  
OMORI TAKEO

## (54) DEFECT INSPECTION SYSTEM

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To realize a highly accurate and efficient automatic defect inspection by receiving the diffracted light of a first illumination from a substrate pattern and the scattering light of a second illumination from the substrate and then performing image processing based on the image of the substrate thus obtained.

**SOLUTION:** The inspection system of detect, e.g. flaw or uneven coating, on the surface of a wafer 2 comprises a first illumination optical system 1 illuminating a parallel luminous flux from a spherical reflector 104, a second illumination optical system 5 illuminating a slit-like light from an optical fiber 502, and a light receiving optical system 3 having a CCD camera 304. The diffracted light pattern of the wafer 2 illuminated by the first illumination optical system 1 is picked up by means of the camera 304 and compared with a prestored defect free wafer image by means of an image processor 4. Since the diffraction angle depends on the pitch pattern, a stage 6 mounting the wafer 2 is inclined appropriately. Furthermore, scattering light from the wafer 2 illuminated by the second illumination optical system 5 is picked up by means of the camera 304 in order to detect the image of a flaw.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C): 1998,2003 Japan Patent Office

## \* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

DETAILED DESCRIPTION

---

## [Detailed Description of the Invention]

[0001]

[The technical field to which invention belongs] This invention relates to the defective test equipment in manufacture processes, such as a semiconductor device, which detects defects, such as a blemish on the surface of a wafer, and spreading nonuniformity.

[0002]

[Description of the Prior Art] Before, the visual inspection by the help is carried out to defective inspection of the blemish on the surface of a wafer, spreading nonuniformity, etc. Moreover, the image of the wafer by the reflected light of the light illuminated to the wafer is incorporated to an image processing system in recent years as what inspects automatically, and there are some which detect the defect on the surface of a wafer.

[0003]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, there were the following troubles with conventional equipment. That is, there is individual difference in the visual inspection by the help, it is inefficient-like, and, generally equipment is also large-sized. Since the wafer surface is observed by the reflected light, a blemish enters and contrast falls depending on the direction, and the blemish itself will stop being able to be visible easily and it will become impossible moreover, to detect in detection of the blemish on the surface of a wafer especially in the automatic test equipment using the reflected light.

[0004] Although this invention is that it is small and simple-like while they are made in view of this trouble and attains the increase in efficiency by automation, it aims at offering defective test equipment with a high detection precision.

[0005]

[Means for Solving the Problem] A stage on which a substrate is put in this invention in order to solve the above-mentioned problem, The first illumination-light study system which illuminates said substrate, and the second illumination-light study system which illuminates said substrate, Light-receiving optical system of a lot which receives only the scattered light from this substrate among illumination light from said first illumination-light study system among the diffracted light from a pattern on said substrate, and illumination light from said second illumination-light study system, It has a leaning device which makes this stage incline, and an image processing system which performs an image processing based on an image of this substrate obtained in this light-receiving optical system, and defective test equipment characterized by inspecting a defect of said substrate is offered.

[0006]

[Embodiment of the Invention] Hereafter, the gestalt of operation of this invention is explained using a drawing. The first illumination-light study system 1 is constituted from the light source 101, the relay lens 102, the surface reflecting mirror 103, and the spherical mirror 104 by the defective test equipment shown in drawing 1. After passing along a relay lens 102 and being reflected with the surface reflecting mirror 103, incidence of the illumination light injected from the light source 101 is carried out to a spherical mirror 104. The illumination light reflected by the spherical mirror 104 serves as the almost parallel flux of light, and faces to a wafer 2. By the stage 6 with the axis of rotation and an axis of tilt, rotation and a tilt are possible for a wafer 2. The diffracted light arises from a wafer 2. As for the produced diffracted light, an angle of diffraction changes with pitches of a pattern. Then, the tilt of the wafer 2 is suitably carried out so that the diffracted light may be led to the light-receiving optical system 3. Drawing 2 showed the situation when carrying out a tilt.

[0007] The light-receiving optical system 3 consists of CCD cameras 304 equipped with the spherical mirror 301, the surface reflecting mirror 302, the light-receiving lens 303, and the CCD image sensor. And the image by the diffracted light of a wafer 2 is formed on the image sensor of CCD camera 304. The optical axis of the light-receiving optical system 3 which carries out incidence to CCD camera 304 is in a different field from the plane which the optical axis of the first illumination-light study system 1 and the optical axis of the light-receiving optical system 3 which sandwiched the wafer 2 make, and a field parallel to space in drawing 1 by being reflected in a field perpendicular to space with the surface reflecting mirror 302. This is for preventing the zero-order diffracted light's, i.e., specular reflection light's, carrying out incidence to direct CCD camera 304 depending on the case, and affecting an image processing among the diffracted lights from a wafer 2.

[0008] The image captured with CCD camera 304 is suitably processed with an image processing system 4. An image processing system 4 compares the image of a wafer without the defect made to remember it beforehand to be the image of the wafer 2 under inspection. When there are defects, such as nonuniformity by defocusing, the

portion is outputted as a defect from the difference of the light and darkness of the portion. It is now based on the normal of a wafer side when carrying out wavelength of  $p$  and the illumination light for the pitch of the pattern of a wafer 2, and not carrying out the tilt of the wafer 2 for  $\lambda$  and the order of diffraction when  $m$  and a wafer 2 are level that is, here.  $\theta_d$  is realized in whenever [ optical axial angle / of  $\theta_i$  and the light-receiving optical system 3 which crosses a wafer 2 similarly ], and  $\theta_t$ , then the following formulas are realized [ whenever / optical axial angle / of the illumination-light study system 1 which crosses a wafer 2 ] in a tilt angle.

[0009]

[Equation 1]

$$\sin(\theta_d - \theta_t) - \sin(\theta_i + \theta_t) = \frac{m\lambda}{p}$$

[0010]  $\theta_i$  considers as minus the angle direction which expects the angle direction expected to an incidence side to a plus and reflection side whenever [ optical axial angle / of the first illumination-light study system 1 ], and optical axial angle [ of the light-receiving optical system 3 ] whenever  $\theta_d$  and tilt angle  $\theta_t$  are considering as plus the angle direction which expects the angle direction expected to an incidence side to a minus and reflection side as a sign is shown in [drawing 3](#). Moreover, the order of diffraction  $m$  is considering as plus the angle direction which expects the angle direction expected to an incidence side on the basis of the specular reflection light of the incident light to a wafer to a minus and reflection side.  $\theta_t=0$  tilt angle -- it is (several 1) --  $\theta_t=0$  -- setting --

[0011]

[Equation 2]

$$\sin \theta_d - \sin \theta_i = \frac{m\lambda}{p}$$

[0012] It becomes the formula showing the relation between a next door, a general incident angle, and an angle of diffraction. As shown in [drawing 2](#), when the diffracted light is led to the light-receiving optical system 3 by the tilt of a wafer 2, the relation of (several 1) is satisfied. The degrees of the diffracted light to incorporate are minus primary and minus secondary. The light source of the first illumination-light study system 1 is a halogen lamp. Ejection and this are used for the light of some wavelength regions as illumination light among the white lights with an interference filter among the light injected from the light source. If detailed-ization of the pitch of the pattern which advances every year is taken into consideration from the pitch and wavelength of a pattern being in proportionality, the shorter one of wavelength is good. However, since the resist non-developed negatives will be exposed if too short, the thing of the wavelength near 550nm is used as illumination light.

[0013] In case the nonuniformity of a spreading failure of a resist, an exfoliation failure, spreading, or exfoliation is detected, the wafer by the existence of a resist may appear and there may be few differences of the direction. This is because the luminous intensity of a place without a resist and the reinforcement after interference of a certain place are in agreement. Interference filters are exchanged and the wavelength of the illumination light is changed so that a difference may appear in reinforcement at this time. When wavelength is changed, it cannot be overemphasized that the tilt of the wafer 2 is carried out so that the relation of (several 1) may be satisfied.

[0014] the optical system of the reflective mold with which the spherical mirror 104 was used for the first illumination-light study system 1 and light-receiving optical system 3 -- a tele cent -- it is rucksack optical system. By the first illumination-light study system 1, it is arranged so that the light source of a wafer side [ a before / a spherical mirror 104 / side focal location and ] may correspond with a backside focal plane mostly. The before [ a spherical mirror 301 ] side focal plane and the wafer side are making the backside focal plane and the entrance pupil side of the light-receiving lens 303 mostly in agreement in the light-receiving optical system 3 again. them -- a tele cent -- rucksack optical system is constituted. It is made a tele cent rucksack for going across how the image captured with CCD camera 304 appears all over a wafer, and making it the same.

[0015] In the optical system which is not a tele cent rucksack, incident angle  $\theta_i + \theta_t$  to the wafer of (several 1) and angle-of-diffraction  $\theta_d - \theta_t$  change with locations on a wafer, respectively. Since the reinforcement of the diffracted light changes depending on the incident angle of incident light, how for it to be visible also by the same defect with the location on a wafer may differ. However, with the equipment shown in [drawing 1](#), since it is a tele cent rucksack, it crosses all over a wafer and incident angle  $\theta_i + \theta_t$  and angle-of-diffraction  $\theta_d - \theta_t$  become uniform. Therefore, if it is the defect same irrespective of the location on a wafer, how to be visible becomes the same and is more advantageous to specification of a defect.

[0016] Moreover, since equipment will be enlarged if the telecentric optical system of refractive media is used, equipment is miniaturized by making it the optical system of the reflective mold using a spherical mirror 104. Since it is merely eccentric optical system, the smaller possible one of the incident angle of the reflected light to a spherical mirror 104 is desirable. It is because astigmatism will become large if not much large. With the equipment shown in [drawing 1](#), it is 10 degrees.

[0017] the first illumination-light study system 1 and the light-receiving optical system 3 -- some conditions are needed for the value of whenever [ each optical axial angle ]. When the incident angle over a wafer generally becomes large, the difference of an incident angle and an angle of diffraction becomes large, and an illumination-light study system and light-receiving optical system will leave it. However, since an incident angle does not exceed 90 degrees, it does not become larger than the difference of an incident angle and an angle of diffraction in case an incident angle is 90 degrees. That is, the difference of the angle of the illumination-light study system 1 and the light-receiving optical system 3 must become smaller than the difference of the incident angle at the time of 90

incident angles, and an angle of diffraction.

[0018] Moreover, if an incident angle is fixed, an angle of diffraction becomes large, so that a pitch is small.

Therefore, since the difference of an incident angle and an angle of diffraction becomes small, the illumination-light study system 1 and the light-receiving optical system 3 must be set up so that it may become smaller than the difference of the incident angle at the time of the minimum pitch, and an angle of diffraction. Then, if it asks for difference  $\theta_d + \theta_i$  of an incident angle and an angle of diffraction when a minimum pitch to be examined is set to  $p_1$  and an incident angle becomes 90 degrees and will place with incident angle  $\theta_i + \theta_t = 90$  to a wafer, since it will be  $\theta_d = 90 - \theta_i$ , (several 1) is [0019].

[Equation 3]

$$\sin(\theta_d - (90 - \theta_i)) - \sin(\theta_i + (90 - \theta_i)) = \frac{m\lambda}{p_1}$$

[0020] It becomes and arranges and is [0021].

[Equation 4]

$$\theta_d + \theta_i = \cos^{-1}\left(-\frac{m\lambda}{p_1} - 1\right)$$

[0022] It becomes. At the maximum of the difference of the angle of the illumination-light study system 1 and the light-receiving optical system 3, this does not become larger than this. That is, the following serves as a requirement.

[0023]

[Equation 5]

$$\theta_d + \theta_i \leq \cos^{-1}\left(-\frac{m\lambda}{p_1} - 1\right)$$

[0024] And if  $\theta_i$  and  $\theta_d$  are set up, tilt angle  $\theta_t$  will be easily called for from (several 1). That is, (several 1), it deforms and is [0025].

[Equation 6]

$$2\cos\left(\frac{\theta_d + \theta_i}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta_d - \theta_i}{2} - \theta_t\right) = \frac{m\lambda}{p}$$

[0026]

[Equation 7]

$$\therefore \theta_t = \left(\frac{\theta_d - \theta_i}{2}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{m\lambda}{2p\cos((\theta_d + \theta_i)/2)}\right)$$

[0027] It becomes. The value actually near the maximum of the conditions acquired by (several 5) is not not much used in practice. It is because an incident angle becomes close to 90 degrees at the time of a minimum pitch to be examined, so the quantity of light which illuminates a wafer becomes less extremely and inspection is affected. As small the one of angular difference as possible is good at the point of making the incident angle to a wafer small and taking many quantity of lights. Since mutual optical system will merely interfere mechanically shortly when too small, it is good to arrange the first illumination-light study system 1 and light-receiving optical system 3 so that it may not interfere and angular difference may become small.

[0028] For example, when a pitch to be examined is set to  $p = 0.4$ –1 micrometer,  $\lambda = 0.55$  micrometers, and  $m = -1$ , angular difference of the illumination-light study system 1 and the light-receiving optical system 3 must be made into 68 degrees or less. Although the angular difference in which it begins to interfere mechanically changes in spherical mirror 104 list with the magnitude of a spherical mirror 301, a focal distance, and configurations of the hardware to attach, it is about 35 degrees about. Therefore, the range of angular difference becomes about 30 degrees by 35 degrees – 68 degrees and width of face. In order to make [ many ] the quantity of light which illuminates a wafer, it will be good to make angular difference into the value near 35 degrees. Temporarily, 20 degrees, then a tilt angle become [ in whenever / optical axial angle / of the first illumination-light study system 1 ] 17 degrees about whenever [ optical axial angle / of the light-receiving optical system 3 ] 20 degrees at the time of 47 degrees and  $p = 1$  micrometer at the time of  $p = 0.4$  micrometers, using angular difference as 40 degrees. Moreover, -20 degrees, then a tilt angle become [ in whenever / optical axial angle / of the first illumination-light study system 1 ] -23 degrees about whenever [ optical axial angle / of the light-receiving optical system 3 ] 60 degrees at the time of 7 degrees and  $p = 1$  micrometer at the time of  $p = 0.4$  micrometers.

[0029] The first illumination-light study system 1 and the light-receiving optical system 3 may be set up so that the range of a tilt angle may receive by the maximum pitch from a minimum pitch to be examined and may become a double sign \*\*\*\* EQC. It is a plus and minus side and is because it may become inconvenient mechanically if there is a bias extremely. Now,  $p_1$  and the tilt angle at that time are set to  $\theta_t$ , and the maximum pitch is set to  $p_2$  for a minimum pitch to be examined. The tilt angle at the time of  $p_2$  is set to  $-\theta_t$ . It is [0030] from (several 1).

[Equation 8]

$$\sin(\theta_d - \theta_i) - \sin(\theta_i + \theta_t) = \frac{m\lambda}{p1}$$

[0031]

[Equation 9]

$$\sin(\theta_d + \theta_t) - \sin(\theta_i - \theta_t) = \frac{m\lambda}{p2}$$

[0032] It is [0033], when the leg of a next door and the both sides is carried out, respectively and they are arranged.

[Equation 10]

$$2 \cos \frac{\theta_d + \theta_i}{2} \sin \frac{\theta_d - \theta_i}{2} = \left( \frac{1}{p1} + \frac{1}{p2} \right) \frac{m\lambda}{2 \cos \theta_t}$$

[0034] It becomes. Moreover, it is [0035], when both sides are lengthened, respectively and are arranged similarly.

[Equation 11]

$$2 \cos \frac{\theta_d + \theta_i}{2} \cos \frac{\theta_d - \theta_i}{2} = \left( \frac{1}{p2} - \frac{1}{p1} \right) \frac{m\lambda}{2 \sin \theta_t}$$

[0036] a next door -- and (several 10) (several 11) -- from -- [0037]

[Equation 12]

$$\tan \frac{\theta_d - \theta_i}{2} = \frac{p1 + p2}{p1 - p2} \tan \theta_t$$

[0038] \*\*\*\*\* Moreover, since (several 10) and (several 11) (several 12)  $\theta_d - \theta_i$ , and  $\theta_d + \theta_i$  can be found,  $\theta_d$  and  $\theta_i$  can also be specified from the tilt range of a wafer. the point -- the same -- a pitch to be examined -- as  $p = 0.4$  micrometer,  $\lambda = 0.55$  micrometers, and  $m = -1$  -- the tilt angle at the time of  $P = 0.4$  micrometers --  $+18$  degrees (tilt angle at the time of  $p = 1$  micrometer -  $18$  degrees) -- then It becomes  $\theta_d - \theta_i = -74.3$  degree or (several 10) (several 11)  $i = 66.2$  degree of  $\theta_d + \theta_i$ , and becomes  $\theta_d = -4.1$  degree and  $\theta_i = 70.3$  degree from (several 12). Moreover, about the tilt angle at the time of  $P = 0.4$  micrometers,  $+15$  degrees then  $\theta_d - \theta_i = -64$  degree, and  $i = 40$  degree of  $\theta_d + \theta_i$  are served as (tilt angle at the time of  $p = 1$  micrometer -  $15$  degrees), and it becomes  $\theta_d = -12$  degree and  $\theta_i = 52$  degree. The one where a tilt angle is smaller is more advantageous from the point of the quantity of light which illuminates a wafer as the difference of an angle with  $\theta_d + \theta_i$ , i.e., the first illumination-light study system, and the light-receiving optical system 3 becomes small and being stated previously. Also at this time, it is natural to be arranged without the first illumination-light study system's 1 and light-receiving optical system's 3 interfering mechanically, and so that a tilt angle may become small. Moreover, since there are few tilt angles and they end, it becomes mechanical more advantageous.

[0039] When a wafer 2 rotates and it is put on a stage 6, the diffracted light comes to have the angle component of the space of drawing, and a perpendicular direction. If there are too many amounts of rotation, the diffracted light will separate from the light-receiving optical system 3, and it will become impossible therefore, to incorporate the image of a wafer 2. Numerical aperture by the side of the wafer of  $\Delta\theta$  and the light-receiving optical system 3 is set [ the absolute magnitude of the amount of rotation of a wafer 2 ] to NA for  $\Delta\phi$  and the angle component of the space of the diffracted light, and a perpendicular direction. The unit of  $\Delta\phi$  and  $\Delta\theta$  is a radian. When  $\Delta\theta$  had very small  $\Delta\phi$ , it turned out that it can express as follows.

[0040]

[Equation 13]

$$\Delta\theta = \left| \frac{m\lambda}{p} \Delta\phi \right|$$

[0041] It is reflected by the spherical mirror of the light-receiving optical system 3, and the diffracted light in which only  $\Delta\theta$  had an angle component by rotation faces to CCD camera 304 mostly at an optical axis and parallel. In case incidence of the diffracted light is carried out to CCD camera 304, it is in the outside of an entrance pupil and will be solved, and it becomes impossible to obtain the image of a wafer 2. Since a spherical mirror to CCD camera 304 is an parallel system, the location of the diffracted light in the entrance pupil side of CCD camera 304 is equivalent to  $\Delta\theta$ , and the radius of an entrance pupil is equivalent to NA in the wafer side of the light-receiving optical system 3, respectively. Therefore, conditions for the diffracted light to carry out incidence to CCD camera 304, even if a wafer 2 carries out rotation are [0042].

[Equation 14]

$$\Delta\theta \leq NA$$

[0043] Come out, and it is and is [0044] from (several 13).

[Equation 15]

$$\delta\phi \leq \left| \frac{p}{m\lambda} NA \right|$$

[0045] A next door and rotation should just be amounts with which are satisfied of (several 15). For example, it becomes a  $\delta\phi \leq 7.3$  MIRIRA azine from  $p = 0.4$  micrometers,  $\lambda = 0.55$  micrometers,  $m = -1$ ,  $NA = 0.01$ , then (several 15). Drawing 4 (a) and (b) are what bent the optical axis by the spherical mirror 301 instead of bending an optical axis with the surface reflecting mirror 302 in the field which is not parallel to space in the equipment shown in drawing 1, and the diffracted light is reflected in space and a perpendicular by hand front in drawing 4 (a). Drawing 4 (b) is drawing which looked at the equipment of drawing 4 (a) from right-hand side, and the light diffracted in the field perpendicular to space with the wafer 2 is reflected in the field parallel to space inside by the spherical mirror 301. As shown in drawing 5 (a) and (b), even if it can, of course, acquire an effect equivalent to the equipment shown in drawing 1 also with such a configuration, and it takes the configuration which incorporates the diffracted light from a spherical mirror 301 to the direct light-receiving lens 303 and CCD camera 304, it is satisfactory in any way.

[0046] In addition, although the image formed on a CCD image sensor turns into an image which the upper and lower sides or right and left reversed with the equipment shown in drawing 4 (a), 4 (b), 5 (a), and 5 (b), it does not become a problem especially in the case of an image processing. What is necessary is to insert one more surface reflecting mirror, or to perform electric processing, and just to make it an erect image, if required. Moreover, although the spherical mirror is used, even if it uses the Fresnel zone plate of a reflective mold, of course in the equipment shown in drawing 1, the same effect can be acquired.

[0047] The scattered light is used for detecting a blemish. the equipment shown in drawing 1 — it is and the second illumination-light study system 5 consists of the light source 501, an optical fiber 502, a wavelength selection filter 503, and a cylindrical lens 504. The same thing as the time of the defective inspection by the diffracted light is used for light-receiving optical system. The illumination-light study system 5 for the scattered lights is arranged in the plane which the optical axis of the first illumination-light study system 1 which crosses a wafer 2, and the optical axis of the light-receiving optical system 3 which crosses a wafer 2 make, and the almost equal plane. Thus, the reason to arrange is for using equipment itself as a compact more.

[0048] The light injected from the light source 501 goes via an optical fiber 502. The configuration of the end face by the side of injection of an optical fiber 502 has the shape of a slit long and slender to space and a perpendicular direction. The wavelength selection filter 503 absorbed the light of short wavelength alternatively among the white lights injected from the light source 501, and has prevented sensitization of the resist non-developed negatives. Since the light injected from the end face of a fiber 502 has breadth, it is made into parallel or an almost parallel light in the field of the direction of a short hand of a slit by the cylindrical lens 504. The light injected from the fiber 502 by this can be made to irradiate a wafer 2 efficiently.

[0049] Then, although light is reflected with a wafer 2, when there is a blemish with the diffracted light by the pattern in that case, the scattered light by the blemish arises. the case where the diffracted light is carrying out incidence although only the scattered light should carry out incidence to the light-receiving optical system 3 — a wafer 2 — a tilt — and rotation is carried out and it is made for the diffracted light not to go into the light-receiving optical system 3. Thereby, only the scattered light produced by the blemish on a wafer is incorporated by CCD camera 304. The image of the blemish by the result and the scattered light is obtained.

[0050] In the equipment shown in drawing 1, although the cylindrical lens is used, the SELFOC lens may be used instead of a cylindrical lens. In this case, what bundled two or more SELFOC lenses is used, and the end face of an optical fiber is arranged in the focal location of the SELFOC lens. The light injected from the optical fiber serves as the parallel flux of light by the SELFOC lens, and faces to a wafer. The light source used at this time is the same as that of the time of using a cylindrical lens. Moreover, the same effect can be acquired even if it uses a fly eye lens instead of the SELFOC lens.

[0051]

[Effect of the Invention] As mentioned above, in this invention, it is performing an image processing based on the image of the substrate by the diffracted light, and an efficient automatic defective inspection is attained. Little [ for moving part ] compact equipment can be obtained by considering an illumination-light study system and light-receiving optical system as immobilization, and carrying out the tilt of the substrate especially.

[0052] Moreover, it is effective for especially detection of a blemish by carrying out rotation of the substrate in the case of inspection by the scattered light.

---

[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-51874

(43) 公開日 平成11年(1999) 2月26日

(51) Int.Cl.<sup>8</sup>

識別記号

F I

G 0 1 N 21/88

G 0 1 N 21/88

F

H 0 1 L 21/66

H 0 1 L 21/66

J

Z

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 7 頁)

(21) 出願番号

特願平9-211057

(22) 出願日

平成9年(1997) 8月5日

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 加藤 欣也

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 大森 健雄

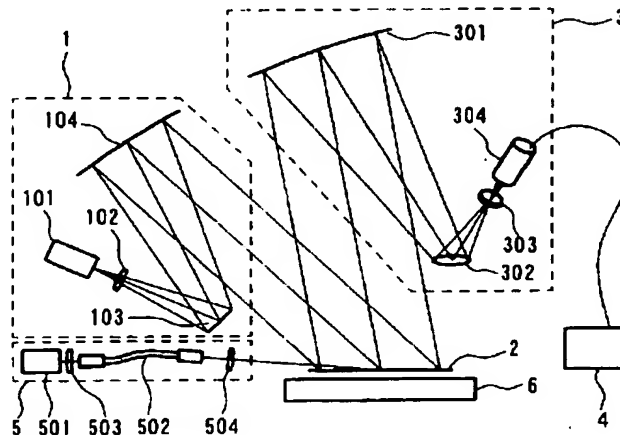
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(54) 【発明の名称】 欠陥検査装置

(57) 【要約】

【課題】 自動化による効率化を図ると共に、小型で簡易的であるにもかかわらず、検出精度の高い欠陥検査装置を提供する。

【解決手段】 基板を載せるステージと、前記基板を照明する第一の照明光学系と、前記基板を照明する第二の照明光学系と、前記第一の照明光学系からの照明光のうち前記基板上のパターンからの回折光ならびに前記第二の照明光学系からの照明光のうち該基板からの散乱光のみを受光する一組の受光光学系と、該ステージを傾斜させる傾斜機構と、該受光光学系にて得られた該基板の画像に基づいて画像処理を行う画像処理装置と、を備え、前記基板の欠陥を検査することを特徴とする欠陥検査装置を提供する。



**【特許請求の範囲】**

【請求項 1】基板を載せるステージと、前記基板を照明する第一の照明光学系と、前記基板を照明する第二の照明光学系と、前記第一の照明光学系からの照明光のうち前記基板上のパターンからの回折光ならびに前記第二の照明光学系からの照明光のうち該基板からの散乱光のみを受光する一組の受光光学系と、前記ステージを傾斜させる傾斜機構と、前記受光光学系にて得られた前記基板の画像に基づいて画像処理を行う画像処理装置と、を備え、前記基板の欠陥を検査することを特徴とする欠陥検査装置。

【請求項 2】前記ステージは、前記基板と垂直な軸に回転可能であり、前記基板と交わる第一の照明光学系の光軸と前記基板と交わる前記受光光学系の光軸とのなす平面は、前記基板と交わる前記第二の照明光学系の光軸と前記基板と交わる前記受光光学系とのなす平面とほぼ同一であることを特徴とする請求項 1 記載の欠陥検査装置。

【請求項 3】前記傾斜機構の傾斜軸は、前記基板の表面内で、かつ、前記基板と交わる前記第一の照明光学系の光軸と前記基板と交わる前記受光光学系の光軸とのなす平面に垂直であることを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の欠陥検査装置。

【請求項 4】前記第一の照明光学系及び前記受光光学系は、実質的にテレセントリックな光学系であり、反射型の光収束素子を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 3 記載の欠陥検査装置。

【請求項 5】前記反射型の光収束素子は、反射球面鏡であることを特徴とする請求項 4 記載の欠陥検査装置。

【請求項 6】前記第一の照明光学系は、複数の波長を選択可能であり、前記第二の照明光学系の波長は、波長幅が少なくとも 100 nm 以上であることを特徴とする請求項 1 乃至 5 記載の欠陥検査装置。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体素子等の製造過程における、ウェハ表面の傷、塗布ムラ等の欠陥を検出する欠陥検査装置に関する。

**【0002】**

【従来の技術】従来より、ウェハ表面の傷、塗布ムラ等の欠陥検査には人手による目視検査が行われている。また、近年は自動的に検査を行うものとして、例えば、ウェハに照明した光の反射光によるウェハの像を画像処理装置に取り込み、ウェハ表面の欠陥を検出するものがある。

**【0003】**

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、従来の装置では、以下のような問題点があった。即ち、人手による目視検査では個人差があり、非効率であり、一般的に装置も大型である。また、反射光を用いた自動検査

装置においては、特にウェハ表面の傷の検出において、反射光でウェハ表面を観察することから、傷の入り方によってはコントラストが低下して傷そのものが見えにくくなり検出できなくなってしまう。

【0004】本発明は斯かる問題点に鑑みてなされるものであり、自動化による効率化を図ると共に、小型で簡易的であるにもかかわらず、検出精度の高い欠陥検査装置を提供することを目的とする。

**【0005】**

【課題を解決するための手段】上記問題を解決するために、本発明では、基板を載せるステージと、前記基板を照明する第一の照明光学系と、前記基板を照明する第二の照明光学系と、前記第一の照明光学系からの照明光のうち前記基板上のパターンからの回折光ならびに前記第二の照明光学系からの照明光のうち該基板からの散乱光のみを受光する一組の受光光学系と、該ステージを傾斜させる傾斜機構と、該受光光学系にて得られた該基板の画像に基づいて画像処理を行う画像処理装置と、を備え、前記基板の欠陥を検査することを特徴とする欠陥検査装置を提供する。

**【0006】**

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態を、図面を用いて説明する。図 1 に示す欠陥検査装置では、第一の照明光学系 1 は、光源 101、リレーレンズ 102、表面反射鏡 103 及び球面反射鏡 104 で構成されている。光源 101 から射出された照明光は、リレーレンズ 102 を通り、表面反射鏡 103 で反射された後、球面反射鏡 104 に入射する。球面反射鏡 104 で反射された照明光は、ほぼ平行な光束となってウェハ 2 に向かう。ウェハ 2 は回転軸及び傾斜軸を持つステージ 6 により、ローテーション及びチルトが可能である。ウェハ 2 からは回折光が生じる。生じた回折光は、パターンのピッチにより回折角が異なる。そこで回折光が、受光光学系 3 に導かれるようにウェハ 2 が適宜チルトされる。チルトした時の様子を示したのが図 2 である。

【0007】受光光学系 3 は、球面反射鏡 301、表面反射鏡 302、受光レンズ 303 及び CCD 撮像素子を備えた CCD カメラ 304 で構成されている。そしてウェハ 2 の回折光による像を CCD カメラ 304 の撮像素子上に形成する。CCD カメラ 304 に入射する受光光学系 3 の光軸は、表面反射鏡 302 で紙面と垂直な面内に反射されることにより、ウェハ 2 を挟んだ第一の照明光学系 1 の光軸と受光光学系 3 の光軸とがなす平面、図 1 では紙面に平行な面とは異なる面内にある。これは、場合によってはウェハ 2 からの回折光のうち 0 次回折光、即ち正反射光が直接 CCD カメラ 304 に入射し、画像処理に影響を与えるのを防ぐためである。

【0008】CCD カメラ 304 で取り込んだ画像は、画像処理装置 4 にて適宜処理される。画像処理装置 4 は、検査中のウェハ 2 の像と、あらかじめ記憶させてお



いた欠陥のないウェハの像とを比較する。デフォーカスによるムラなどの欠陥がある場合はその部分の明暗の差から、その部分を欠陥として出力する。今ここで、ウェハ2のパターンのピッチを $p$ 、照明光の波長を $\lambda$ 、回折次数を $m$ 、ウェハ2が水平の時、つまりウェハ2をチルトしてない時のウェハ面の法線を基準として、ウェハ2と交わる照明光学系1の光軸角度を $\theta_i$ 、同様にウェハ2と交わる受光光学系3の光軸角度を $\theta_d$ 、また、チルト角を $\theta_t$ 、とすれば以下の式が成り立つ。

【0009】

【数1】

$$\sin(\theta_d - \theta_t) - \sin(\theta_i + \theta_t) = \frac{m\lambda}{p}$$

【0010】符号については図3に示すとおり、第一の照明光学系1の光軸角度 $\theta_i$ は入射側に見込む角度方向をプラス、反射側に見込む角度方向をマイナスとし、受光光学系3の光軸角度 $\theta_d$ 、チルト角 $\theta_t$ は、入射側に見込む角度方向をマイナス、反射側に見込む角度方向をプラスとしている。また、回折次数 $m$ はウェハへの入射光の正反射光を基準として入射側に見込む角度方向をマイナス、反射側に見込む角度方向をプラスとしている。チルト角 $\theta_t$ が0度なら(数1)で $\theta_t = 0$ とにおいて

【0011】

【数2】

$$\sin \theta_d - \sin \theta_i = \frac{m\lambda}{p}$$

【0012】となり、一般的な入射角と回折角の関係を示す式になる。図2に示したように、ウェハ2のチルトにより回折光が受光光学系3に導かれた時、(数1)の関係を満足している。取り込む回折光の次数は、マイナス一次及びマイナス二次である。第一の照明光学系1の光源は例えばハロゲンランプである。光源から射出された光のうち、干渉フィルタによって白色光のうち、一部の波長域の光を取り出し、これを照明光として利用する。パターンピッチと波長とが比例関係にあることから、年々進むパターンピッチの微細化を考慮すれば波長は短いほうがよい。しかし、あまりに短くと未現像のレジストを感光させてしまうので、550nm付近の波長のものを照明光として使用している。

【0013】レジストの塗布忘れ、剥離忘れ、塗布や剥離のムラを検出する際に、レジストの有無によるウェハの見え方の差が少ない場合がある。これはレジストのない所の光の強度と、ある所の干渉後の強度が一致するためである。この時は強度に差が出るように、干渉フィルタを交換して照明光の波長を変更する。波長を変更した場合、(数1)の関係を満足するようにウェハ2をチルトさせるのは言うまでもない。

【0014】第一の照明光学系1及び受光光学系3は、球面反射鏡104を用いた反射型の光学系でテレセントリックな光学系である。第一の照明光学系1では、光源

が球面反射鏡104の前側焦点位置、ウェハ面が後側焦点面とほぼ一致するように配置されている。受光光学系3では、球面反射鏡301の前側焦点面とウェハ面とが、また後側焦点面と受光レンズ303の入射面とをほぼ一致させている。それらによってテレセントリックな光学系を構成している。テレセントリックにするのは、CCDカメラ304で取り込んだ画像の見え方を、ウェハ全面に渡って同じにするためである。

【0015】テレセントリックでない光学系では、ウェハ上の位置により、(数1)のウェハへの入射角 $\theta_i + \theta_t$ 、回折角 $\theta_d - \theta_t$ がそれぞれ異なる。回折光の強度は入射光の入射角に依存して変化するため、同じ欠陥でもウェハ上の位置により見え方が異なる場合がある。しかし、図1に示す装置ではテレセントリックなので、ウェハ全面に渡って入射角 $\theta_i + \theta_t$ 、回折角 $\theta_d - \theta_t$ が一樣となる。故にウェハ上の位置にかかわらず同じ欠陥であれば見え方が同じになり、欠陥の特定に、より有利である。

【0016】また、屈折系のテレセントリック光学系を用いると装置が大型化するため、球面反射鏡104を用いた反射型の光学系にすることで、装置を小型化している。ただ偏心光学系なので、球面反射鏡104に対する反射光の入射角は出来るだけ小さい方が望ましい。あまり大きいと非点収差が大きくなるからである。図1に示す装置では、10度になっている。

【0017】第一の照明光学系1及び受光光学系3それぞれの光軸角度の値には、ある条件が必要となる。一般にウェハに対する入射角が大きくなると、入射角と回折角の差は大きくなり、照明光学系と受光光学系が離れていくことになる。しかし、入射角は90度を越えることがないので、入射角が90度の時の入射角と回折角の差より大きくなることはない。つまり、照明光学系1と受光光学系3との角度の差は、入射角90度の時の入射角と回折角との差より小さくならなければならない。

【0018】また、入射角が一定なら、ピッチが小さいほど回折角が大きくなる。従って入射角と回折角との差が小さくなるので、最少ピッチの時の入射角と回折角との差より小さくなるように照明光学系1と受光光学系3とが設定されなければならない。そこで検査対象の最小ピッチを $p_1$ とし、入射角が90度になった時の入射角と回折角の差 $\theta_d + \theta_i$ を求めると、ウェハへの入射角 $\theta_i + \theta_t = 90$ と置けば、 $\theta_t = 90 - \theta_i$ だから、(数1)は、

【0019】

【数3】

$$\sin(\theta_d - (90 - \theta_i)) - \sin(\theta_i + (90 - \theta_i)) = \frac{m\lambda}{p_1}$$

【0020】となり、整理して、

【0021】

【数4】

$$\theta d + \theta i = \cos^{-1} \left( -\frac{m\lambda}{p1} - 1 \right)$$

【0022】となる。これが照明光学系1と受光光学系3の角度の差の最大値で、これより大きくなることはない。つまり以下が必要条件となる。

【0023】

【数5】

$$\theta d + \theta i \leq \cos^{-1} \left( -\frac{m\lambda}{p1} - 1 \right)$$

【0024】そして、 $\theta i$ 、 $\theta d$ を設定すれば、チルト角 $\theta t$ は(数1)から容易に求められる。即ち(数1)を変形して、

【0025】

【数6】

$$2 \cos \left( \frac{\theta d + \theta i}{2} \right) \sin \left( \frac{\theta d - \theta i}{2} - \theta t \right) = \frac{m\lambda}{p}$$

【0026】

【数7】

$$\therefore \theta t = \left( \frac{\theta d - \theta i}{2} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{m\lambda}{2p \cos \left( (\theta d + \theta i)/2 \right)} \right)$$

【0027】となる。実際、(数5)で得られる条件の最大値に近い値を用いることは実際はあまりない。何故なら、検査対象の最小ピッチの時に入射角が90度に近くなるため、ウェハを照明する光量が極端に減り、検査に影響を及ぼすからである。ウェハへの入射角を小さくして光量を多くするという点では、角度差はなるべく小さい方がよい。ただあまりに小さいと、今度は機械的に互いの光学系が干渉することになるので、干渉せず、かつ、角度差が小さくなるよう、第一の照明光学系1と受光光学系3とを配置するのがよい。

【0028】例えば、検査対象ピッチを $p=0.4 \sim 1 \mu m$ 、 $\lambda=0.55 \mu m$ 、 $m=-1$ とすると、照明光学系1と受光光学系3の角度差は、 $68^\circ$ 以下にしなければならないことになる。機械的に干渉し始める角度差は、球面反射鏡104並びに球面反射鏡301の大きさ、焦点距離、取り付けの金物の形状によって異なるが、およそ $35^\circ$ 位である。従って、角度差の範囲は $35^\circ \sim 68^\circ$ 、幅で約 $30^\circ$ となる。ウェハを照明する光量を多くするには、角度差を $35^\circ$ に近い値にするのがよいことになる。仮に、角度差を $40^\circ$ として第一の照明光学系1の光軸角度を $20^\circ$ 、受光光学系3の光軸角度を $20^\circ$ とすれば、チルト角は、 $p=0.4 \mu m$ の時は $47^\circ$ 、 $p=1 \mu m$ の時は $17^\circ$ となる。また、第一の照明光学系1の光軸角度を $60^\circ$ 、受光光学系3の光軸角度を $-20^\circ$ とすれば、チルト角は、 $p=0.4 \mu m$ の時は $7^\circ$ 、 $p=1 \mu m$ の時は $-23^\circ$ となる。

【0029】チルト角の範囲は、検査対象の最小ピッチから最大ピッチまでに対してプラスマイナスほぼ同等になるよう、第一の照明光学系1、受光光学系3が設定さ

れる場合もある。プラス側とマイナス側で極端に偏りがあると機械的に不都合になる場合があるからである。

今、検査対象の最小ピッチを $p1$ 、その時のチルト角を $\theta t$ 、最大ピッチを $p2$ とする。 $p2$ の時のチルト角は $-\theta t$ となる。(数1)より

【0030】

【数8】

$$\sin(\theta d - \theta t) - \sin(\theta i + \theta t) = \frac{m\lambda}{p1}$$

【0031】

【数9】

$$\sin(\theta d + \theta t) - \sin(\theta i - \theta t) = \frac{m\lambda}{p2}$$

【0032】となり、両辺をそれぞれ足して整理すると、

【0033】

【数10】

$$2 \cos \frac{\theta d + \theta i}{2} \sin \frac{\theta d - \theta i}{2} = \left( \frac{1}{p1} + \frac{1}{p2} \right) \frac{m\lambda}{2 \cos \theta t}$$

【0034】となる。また、同様に両辺をそれぞれ引いて整理すると、

【0035】

【数11】

$$2 \cos \frac{\theta d + \theta i}{2} \cos \frac{\theta d - \theta i}{2} = \left( \frac{1}{p2} - \frac{1}{p1} \right) \frac{m\lambda}{2 \sin \theta t}$$

【0036】となり、(数10)及び(数11)から

【0037】

【数12】

$$\tan \frac{\theta d - \theta i}{2} = \frac{p1 + p2}{p1 - p2} \tan \theta t$$

【0038】を得る。また、(数10)、(数11)及び(数12)より $\theta d - \theta i$ 、 $\theta d + \theta i$ が求まるので、ウェハのチルト範囲から $\theta d$ 、 $\theta i$ を特定することも出来る。先と同様、検査対象ピッチを $p=0.4 \sim 1 \mu m$ 、 $\lambda=0.55 \mu m$ 、 $m=-1$ として、 $P=0.4 \mu m$ の時のチルト角を $+18^\circ$  ( $p=1 \mu m$ の時のチルト角は $-18^\circ$ )とすれば、(数12)より $\theta d - \theta i = -74.3^\circ$ 、(数10)または(数11)より $\theta d + \theta i = 66.2^\circ$ となり、 $\theta d = -4.1^\circ$ 、 $\theta i = 70.3^\circ$ となる。また、 $P=0.4 \mu m$ の時のチルト角を $+15^\circ$  ( $p=1 \mu m$ の時のチルト角は $-15^\circ$ )とすれば、 $\theta d - \theta i = -64^\circ$ 、 $\theta d + \theta i = 40^\circ$ となり、 $\theta d = -12^\circ$ 、 $\theta i = 52^\circ$ となる。チルト角が小さい方が、 $\theta d + \theta i$ 、即ち第一の照明光学系1と受光光学系3との角度の差が小さくなり、先に述べたようにウェハを照明する光量の点から、より有利である。この時も、第一の照明光学系1と受光光学系3が機械的に干渉しないで、かつ、チルト角が小さくなるように配置されることはもちろんである。また、チルト角が

少なくてもすむので、機械的にもより有利となる。

【0039】ウェハ2が回転してステージ6に乗せられた場合、回折光が図の紙面と垂直方向の角度成分を持つようになる。故にローテーション量が多すぎると回折光が受光光学系3から外れてしまい、ウェハ2の像を取り込めなくなってしまう。ウェハ2のローテーション量の絶対量を $\delta\phi$ 、回折光の紙面と垂直方向の角度成分を $\delta\theta$ 、受光光学系3のウェハ側の開口数をNAとする。 $\delta\phi$ 、 $\delta\theta$ の単位はラジアンである。 $\delta\theta$ は、 $\delta\phi$ がごく小さければ、以下のように表せることがわかった。

【0040】

【数13】

$$\delta\theta = \left| \frac{m\lambda}{p} \delta\phi \right|$$

【0041】ローテーションにより $\delta\theta$ だけ角度成分を持った回折光は、受光光学系3の球面反射鏡で反射され、ほぼ光軸と平行にCCDカメラ304へと向かう。回折光は、CCDカメラ304に入射する際に入射瞳の外側にあるとけられてしまい、ウェハ2の像を得ることができなくなる。球面反射鏡からCCDカメラ304までは平行系であるから、CCDカメラ304の入射瞳面での回折光の位置は $\delta\theta$ に、また、入射瞳の半径は受光光学系3のウェハ面でのNAにそれぞれ相当する。従って、ウェハ2がローテーションしても回折光がCCDカメラ304に入射するための条件は、

【0042】

【数14】

$$\delta\theta \leq NA$$

【0043】であり、(数13)より

【0044】

【数15】

$$\delta\phi \leq \left| \frac{p}{m\lambda} NA \right|$$

【0045】となり、ローテーションは(数15)を満足する量であれば良い。例えば $p = 0.4 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 、 $m = -1$ 、 $NA = 0.01$ とすれば、

(数15)より、 $\delta\phi \leq 7.3$ ミリラアジンとなる。図4(a)及び(b)は、図1に示す装置において、表面反射鏡302で光軸を紙面と平行でない面内に曲げる代わりに球面反射鏡301で光軸を曲げたもので、図4

(a)では、紙面と垂直に、手前方向に回折光が反射されている。図4(b)は、図4(a)の装置を右側から見た図で、ウェハ2で紙面と垂直な面内に回折された光が、球面反射鏡301で紙面と平行な面内に反射されている。この様な構成でも図1に示す装置と同等の効果を得られるのは勿論であるし、図5(a)及び(b)に示したように、球面反射鏡301から直接受光レンズ303、CCDカメラ304に回折光を取り込む構成を取っても何ら問題はない。

【0046】なお、図4(a)、4(b)、5(a)及び5(b)に示した装置では、CCD撮像素子上に形成される像は上下、若しくは左右が反転した像となるが、画像処理の際に特に問題となるものではない。必要であれば表面反射鏡をもう1枚挿入するか、電気的な処理を施して正立像にすればよい。また、図1に示す装置においては、球面反射鏡を用いているが、反射型のフレネルゾーンプレートを用いても同様の効果を得ることが出来るのは勿論である。

【0047】傷を検出するには散乱光を用いる。図1に示す装置において、第二の照明光学系5は、光源501、光ファイバー502、波長選択フィルタ503及びシリンドリカルレンズ504からなる。受光光学系は、回折光による欠陥検査の時と同じものを使用する。散乱光用の照明光学系5は、ウェハ2と交わる第一の照明光学系1の光軸と、ウェハ2と交わる受光光学系3の光軸とがなす平面と、ほぼ等しい平面内に配置されている。このように配置する理由は、装置自体をよりコンパクトにするためである。

【0048】光源501から射出された光は、光ファイバー502を経由する。光ファイバー502の射出側の端面の形状は、紙面と垂直方向に細長いスリット状である。波長選択フィルタ503は、光源501から射出された白色光のうち、短波長の光を選択的に吸収し、未現像のレジストの感光を防いでいる。ファイバー502の端面から射出された光は、広がりを持つため、シリンドリカルレンズ504にてスリットの短手方向の面内で平行、もしくはほぼ平行な光にする。これによりファイバー502から射出された光を効率良くウェハ2に照射させることが出来る。

【0049】その後、光はウェハ2で反射されるが、その際にパターンによる回折光と、傷がある場合には傷による散乱光が生じる。受光光学系3には、散乱光のみが入射すれば良いが、回折光が入射している場合はウェハ2をチルト、及びローテーションさせ、回折光が受光光学系3に入らないようにする。これにより、ウェハ上の傷によって生じた散乱光のみがCCDカメラ304に取り込まれる。結果、散乱光による傷の像が得られる。

【0050】図1に示す装置においては、シリンドリカルレンズを用いているが、シリンドリカルレンズのかわりにセルフオックレンズを用いてもよい。この場合は複数のセルフオックレンズを束ねたものが使用され、光ファイバーの端面はセルフオックレンズの焦点位置に配置される。光ファイバーから射出された光はセルフオックレンズで平行光束となってウェハに向かう。この時使用される光源等はシリンドリカルレンズを用いたときと同様である。また、セルフオックレンズの代わりにフライアイレンズを用いても同様の効果を得ることが出来る。

【0051】

【発明の効果】以上のように本発明においては、回折光による基板の画像に基づいて画像処理を行うことで、効率的な自動欠陥検査が可能となる。特に照明光学系、受光光学系を固定とし、基板をチルトさせることによって、可動部分の少ない、コンパクトな装置を得ることが出来る。

【0052】また、散乱光での検査の際に基板をローテーションさせることで、特に傷の検出に効果的である。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態を示す装置の構成図である。

【図2】 ステージを傾けたときを示す図である。

【図3】 符号を示す図である。

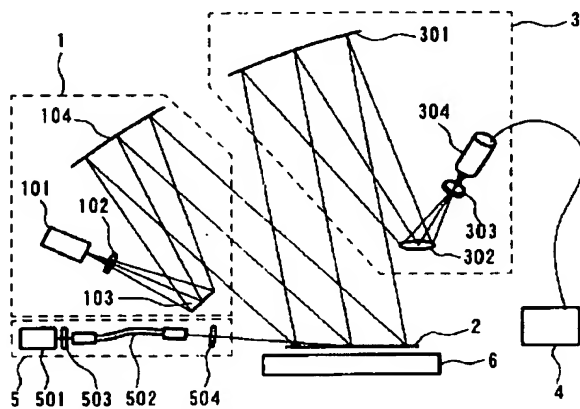
【図4】 他の実施の形態を示した図である。

【図5】 更に他の実施の形態を示した図である。

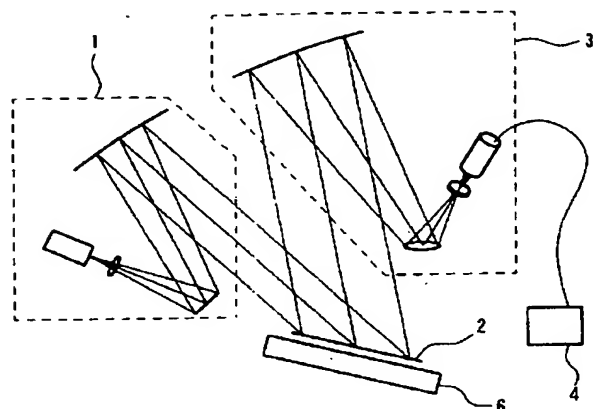
【符号の説明】

- |   |          |
|---|----------|
| 1 | 第一の照明光学系 |
| 2 | 基板       |
| 3 | 受光光学系    |
| 4 | 画像処理装置   |
| 5 | 第二の照明光学系 |
| 6 | ステージ     |

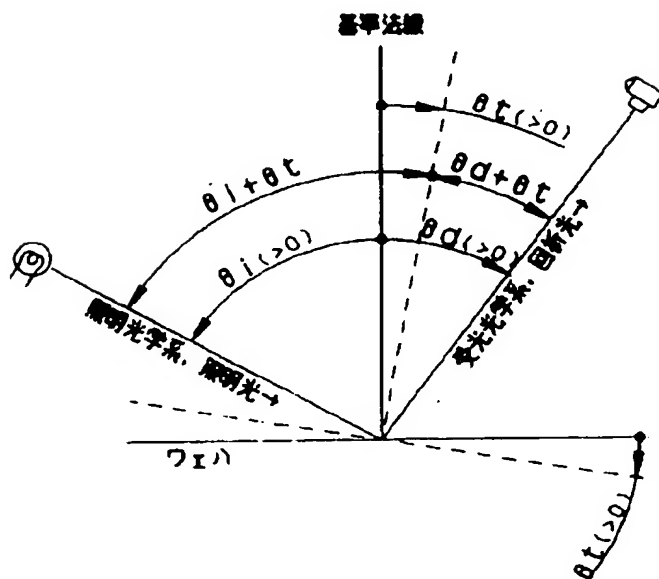
【図1】



【図2】

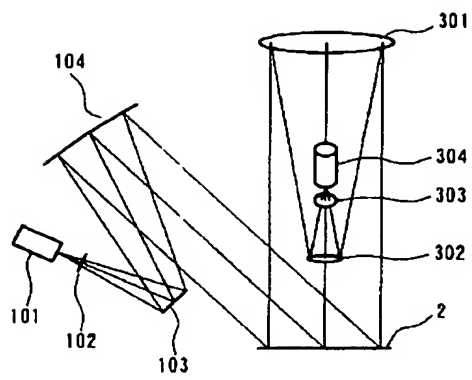


【図3】

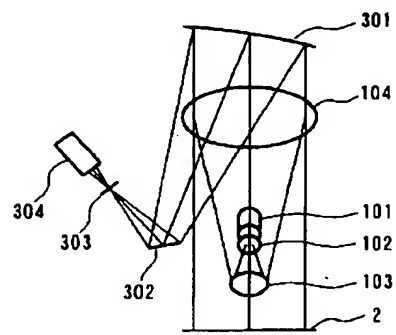


【図 4】

(a)

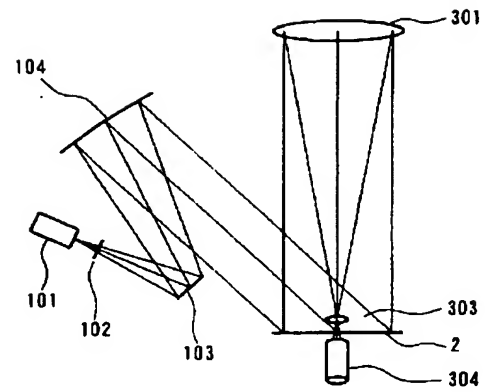


(b)



【図 5】

(a)



(b)

